

华北地区深层地下水回补修复试点 研究与思考

水利部科学技术委员会华北地下水超采综合治理咨询组

摘要:华北地区目前仍然存在深层承压水超采问题,且深层承压水补给更新困难,含水层难以实现自然恢复,导致地下水降落漏斗长期存在,进一步引发了地面沉降、海(咸)水入侵等一系列生态损害、地质灾害,对区域生产生活和生态安全造成持续影响。针对华北地区深层地下水超采与亏空问题,提出了“点线面”结合的工作思路和“压采、补给、回灌”的系统治理修复模式,介绍了4处建成的深层水回补试验场条件及实施回补试验取得的进展,总结了依托回补试验开展的各项专题研究所取得的成果和结论,梳理了回补试点存在的试验周期短、研究不充分、水源待优化、试验场需完善等问题,并针对性提出了深化长期试验、优化回补区域与水源、加强防堵促渗技术研发、强化科技支撑、开展回补效果评估、完善科研平台建设及加大专项经费支撑力度等对策建议,以期为系统开展深层地下水回补修复、保障地下水资源可持续利用提供参考。

关键词:深层地下水;回补修复;地下水超采;华北地区

Pilot studies and reflections on deep groundwater recharge and restoration in North China//Consultation Group for Comprehensive Management of Groundwater Overdraft in North China, Science and Technology Committee, Ministry of Water Resources

Abstract: Overdraft of confined deep groundwater remains a serious issue in North China, where natural recovery is difficult due to limited recharge and slow renewal of deep aquifers. This has led to the long-term existence of groundwater depression cones, further triggering a series of ecological damages and geological hazards such as ground subsidence and seawater intrusion, exerting ongoing impacts on regional production, livelihoods, and ecological security. To address the groundwater depletion caused by long-term overdraft, a coordinated “point-line-area” approach and a comprehensive governance and restoration model integrating “suppression, recharge, and reinjection” have been proposed. This paper introduces the conditions and progress of recharge experiments conducted at four established pilot sites, and summarizes the findings and outcomes of a series of thematic studies carried out in conjunction with these recharge trials. Existing challenges of the pilot projects are identified, including short experimental durations, insufficient research, unoptimized water sources, and the need for improved test site conditions. In response, several targeted recommendations are proposed: extending the duration and depth of experimental studies, optimizing recharge areas and water sources, advancing research on anti-blocking and permeability-enhancement technologies, strengthening scientific and technical support, evaluating recharge effectiveness, improving research platform infrastructure, and increasing dedicated financial support, aiming to provide experiences for systematic recharge and restoration of deep groundwater and ensure sustainable utilization of groundwater resources.

Keywords: deep groundwater; recharge and restoration; groundwater overdraft; North China

中图分类号: TV211.1 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2025)15-0001-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.15.001

收稿日期: 2025-07-25

作者简介: 水利部科学技术委员会华北地下水超采综合治理咨询组, 成员包括仲志余, 张建云, 王焰新, 吴吉春, 贾绍凤, 李原园, 王建华, 李文鹏, 束龙仓, 丁爱中, 王旭升, 黄振芳, 张增勤, 陈飞。

一、研究背景

水是生命之源、生产之要、生态之基，地下水作为水资源的重要组成部分，在维持生态平衡、保障工农业生产和居民生活用水等方面发挥着至关重要的作用。华北地区作为我国政治、经济和文化的重要区域，由于人口密集和经济发展迅速，长期以来对水资源的需求持续增长，然而该地区水资源先天不足，人均水资源量远低于全国平均水平，属于严重缺水地区。在这种背景下，华北地区长期过量开采地下水成为满足用水需求的无奈之举，由此引发了一系列严峻的生态与地质问题，如地下水水位持续下降、地面沉降、海（咸）水入侵等，严重威胁到该地区的生态安全、经济可持续发展和人民群众的生活质量。

党中央、国务院高度关注华北地区地下水超采问题。习近平总书记多次强调，必须高度重视地下水超采问题，从实现长治久安的高度和以对历史负责的态度做好这方面工作，修复华北平原地下水超采及地面沉降。总书记在中央财经领导小组第五次会议上的讲话中提出，要把华北地面沉降问题作为一个重大专项，提出可操作的实施方案，纳入京津冀协同发展的顶层设计中。这一系列重要指示为华北地区地下水超采治理工作指明了方向，凸显了工作的紧迫性和重要性。

开展深层地下水回补试点工作，是华北地区应对地下水超采危机的关键举措。通过科学合理地向深层地下含水层补充水量，有望有效缓解地下水水位下降趋势，控制地面沉降速度，遏制海（咸）水入侵，逐步恢复地下水生态系统的平衡与稳定。这不仅对于改善华北地区的生态环境、保障水资源的可持续利用具有重大现实意义，而且对于推动区域经济社会的协调发展、实现人与自然的和谐共生具有深远的战略意义。因此，深入研究华北地区深层地下水回补试点工作，总结经验教训，发现问题并提出针对性的解决方案，具有极其重要的理论和实践价值。

二、华北深层地下水回补治理主要进展与成效

1. 系统修复思路基本确立

坚持问题导向和系统观念，水利部水资源司牵头组织相关司局和水规总院，结合深层地下水赋存特点以及当前华北地区地下水超采综合治理有效措施，编制了《华北地区深层地下水总体修复方案》，提出按照

“点线面”结合的工作思路，采取“压采、补给、回灌”的系统治理修复模式，推进下一阶段华北地区深层地下水治理修复工作，以缓解生态损害与地质灾害问题。

（1）在“面”上采取置换减采措施，压减深层地下水开采量

目前河北中东部地区仍然存在约900余万亩（1亩=1/15 hm²）取用深层承压水的灌溉农田，正常降水条件下每年开采深层承压水量高达约6亿m³，把这些地块开采的深层承压水置换出来，是解决华北地区深层地下水超采问题最主要、最紧迫的任务，也是最有效的治理措施。

（2）在“线”上选择优势河流或河段实施生态补水，为深层地下水侧向循环补给创造有利条件

开展钻孔、物探、地面调查和水文地质参数数据集等多源数据融合分析，圈定不同地貌条件下地下水回补优势通道，归纳总结不同地貌条件、不同尺度下优势通道特异性区域特征与沉积环境。在山前倾斜平原，以河流冲积扇为重点，识别地下水回补优势通道，侧向补给深层承压水；在中东部平原寻找深浅含水层隔水天窗深层承压水补给优势通道，利用自然重力方式回补深层承压水。

（3）在“点”上实施深层地下水人工回补，通过钻孔方式人工回补深层地下水

针对地面沉降或海水入侵问题突出、生态环境保护要求高、地质构造封闭性强等区域，在确保水质满足要求的前提下，探索开展深层水人工回补试点，进一步总结经验、凝炼技术，为后续推广深层水回补技术奠定基础。

2. 回补试验场建设成效显著

高标准建成深层水回补试验场4处。其中，唐山市乐亭县回补试验场建成回补井4眼、监测井5眼，沧州市运河区回补试验场建成回补井4眼、一孔多层监测井1眼、分层标5眼，衡水市桃城区试验场建成回补井4眼、水位监测井34眼、分层标4眼、孔隙水压力监测井1眼，衡水市阜城县试验场建成回补井2眼、水位监测井15眼、分层标3眼。

以上试验场可支撑开展单井和多井、加压和无压、定期等量回扬、不定期不等量回扬、不同回补井工艺（不同井径、不同填砾厚度）、不同水文地质条件、不同目标层位等系列原位试验，可围绕深层水回补的典型性、机理、规律等开展全方位研究。结合回补系统、智能控制系统及水质水位监测等设备，可基本实现试验场内回补量、水位、水压、回扬量、分层标、孔隙水压力

等数据的自动监测和上传,全自动管理回补过程。

3. 回补试验取得积极进展

依托回补试验场,河北省积极探索实施了不同含水层类型和成井工艺条件下,变流量、定流量,单井、多井,定时回扬、不定时回扬等多种类型的重力回补试验。2024年1月1日至11月30日,衡水、沧州、唐山3个回补试验点累计回补量分别为2.24万 m^3 (阜城0.54万 m^3 、桃城1.70万 m^3)、12.74万 m^3 、7.09万 m^3 ,全省累计回补量22.07万 m^3 。根据当前试验进程,沧州市新建回补井回补能力最大,单井小时回补量可达60 m^3 ,衡水试验场预测单井小时回补量可超过60 m^3 。验证了采用重力回补方式实施深层水回补从技术上可行。

4. 专题研究成果丰富

依托回补试验,稳步开展了各项专题研究,取得了丰富的研究成果和结论。其中,围绕地下水的运动规律,开展了试验场尺度和衡水市区域尺度的地下水流数值模型构建;围绕深层地下水的高效回补,开展了补堵塞机理和防堵促渗技术的系列研究;围绕利用回补解决地面沉降问题,搭建了市域尺度的地下水流-土体形变耦合模型,以及回补试验场场地尺度的井-储多场耦合模型;围绕利用回补解决海(咸)水入侵问题,开展了试验场5 km范围内咸淡水界线一月一次物探跟踪监测。

研究结果显示:①实施深层地下水回补可有效减缓地面沉降,尤其是在区域地下水水位降落漏斗核心区,开展地下水人工补给可更加明显地减缓地面沉降的发生和发展;②实施深层地下水回补可缓解海(咸)水入侵问题,回补对咸淡水界线推移有效果,尤其对回补层位附近矿化度扰动明显;③通过改善成井工艺、控制回补水源水质、定期回扬可一定程度缓解深层地下水回补堵塞的时间和程度;④提高回补压力,仅能在较短时间内提高回补效率,长期回补可能造成堵塞区域向含水层内部扩大,增加堵塞治理难度。利用自来水开展地下水人工回补,主要的堵塞原因是碳酸盐矿物的沉淀。通过试验进一步提高了对回补堵塞机理的认识,为高效开展回补试验、研发堵塞控制技术提供理论和基础支撑。

5. 关键技术设备研发取得突破

对回补井建设、设备安装、洗井、回补、监测等方面存在的问题进行系统深入研究分析,并取得了一定研究进展:一是针对在有限井径范围内实现一根泵管兼具回补和回扬功能的问题,研发了大流量易检修回补回扬转

换控制装置;二是针对安全准确实时高频率监测回扬水水质的问题,研发了回扬水水质实时监测装置;三是针对大埋深回补井内瀑布流形成和气体堵塞的问题,研发了回补水流态控制设备;四是针对准确定位大埋深不同直径回补井井壁的堵塞物并高效清除的问题,研发了井壁堵塞物定位监测与清除设备。目前,以上防堵促渗控制技术设备均已通过野外应用验证,大流量易检修回补回扬转换控制装置已经在衡水市回补试验场内的6眼回补井内进行了安装应用。

三、深层地下水回补试点存在的主要问题

1. 试验周期短,关键参数尚未明确

当前各类回补试验开展时间较短,衡水试验场还未通过试验得出最佳补给能力,不同地层结构、不同含水层岩性、不同回补区域(非漏斗区和漏斗上下游)、不同井径条件下的回补相关参数尚未得出;部分促渗增效关键技术、数值模型模拟技术等应用验证时间不足。

2. 部分试验研究开展不充分

不同水源水化学类型、离子配比存在差异,可能产生絮凝物堵塞回补通道,但当前研究仅对水化学类型进行简单分析,未深入探究水化学反应机理及对堵塞的影响机制。此外,回补期间未同步开展气温、回补水水温、地下水水温等环境因子监测,难以准确识别影响回补效率的关键因素,制约了回补技术的优化升级。

3. 回补水源有待优化

当前回补主要依赖以南水北调为水源的自来水,衡水、沧州、唐山回补价格分别为5.10元/ m^3 、5.29元/ m^3 、4.10元/ m^3 ,长期规模化回补的经济压力较大。同时,自来水中含有的消毒副产物未达到直接饮用水标准,可能影响深层地下水水质,并在回补过程中可能与原位地下水发生氧化还原反应,增加堵塞风险。

4. 回补试验场仍需完善

目前,河北省虽已建成全国最大的深层水回补试验场,但面向解决地面沉降、海(咸)水入侵问题等重大科技需求,以及攻克深层地下水运动规律、提升回补效率、解决堵塞问题、地下水流场模拟等重大科学问题,需建成长期运行、高度开放、共享共用的科研平台,试验场的实验设备、监测设备等仍有待进一步完善。

四、推进深层地下水回补工作的建议

1. 深入开展试验研究

按照“试验时间能长尽量长、试验方式能多尽量

多”的要求,开展多形式回补试验,克服困难坚持长期观测,同步加强对数据和数据处理方式的积累,通过开展长期回补试验,摸清地下水动力场及水化学场运动变化、回补水量衰减、咸淡水界面演变等规律。

2. 优化回补试验区域

结合同位素示踪技术,选择水体更新周期比较长或难以更新的区域开展人工回补,排除降雨或侧向补给造成的干扰;探索运用示踪、勘探技术,结合模拟和历史调研等综合方法,开展地下水优势通道相关研究,垂向上可通过对不同层位的地下水水位开展动态分析,结合河北省较为普遍存在的多层混合开采井开展研究;横向上可根据大量钻孔资料、抽水试验资料高精度刻画地层结构,或选择重点地段做机器化的物理探测,从渗透性的指向方面开展研究。

3. 优化回补水源

针对引江水、当地地表水、微咸水等原水开展原型试验,通过对各类水源和当地地下水中各种离子成分进行分析,观察不同水质混合的水化学反应及对地下水水质的影响,科学确定回补水源水质标准。通过制定针对不同水源的地下水回补水质处理技术方案,拓展水源类型,建立深层地下水回补专用水厂,开展人工回补,降低回补成本。

4. 优化成井工艺,借鉴其他行业先进技术

加强成井工艺对回补效率的相关研究,通过室内、野外试验,优化成井工艺,实现长久回补。可以探索借鉴石油部门的水平井、辐射井技术,用人工方法开辟横向通道,提高回补效率,增加回补水量;加强对水文地质、地球物理、水文生物、地球化学的原位监测技术,石油专业的钻井技术,大气专业的监测技术等先进技术的借鉴应用。

5. 加强对防堵促渗技术的研发

加强对物理阻塞、化学堵塞、生物堵塞及气体堵塞的相关研究。从堵塞机理、堵塞物质的来源、回扬的水量和频次、回补水量衰减规律、堵塞技术处理前后回补水量和各类监测数据的变化、堵塞物质的去除技术等方面加强研究,为研发防堵促渗技术提供科学支撑。

6. 强化科技支撑

对国内外深层地下水回补、地热回补、石油开采等领域开展调查研究,总结经验做法、关键问题和技术成本。加强对回补场地水文地质条件的精细刻画,借助多部门资料,开展水文地质与回补地层综合分析研究,实现精准回补。利用水化学分析、同位素监测

和地球物理探测等新技术,对水位变化及成因进行分析,摸清深层地下水补径排关系,加强对深层地下水循环更新规律的研究;强化对数字孪生的相关研究,结合大数据数字孪生技术、人工智能等信息技术,加强地下水模型研发和业务应用,逐步提升回补工作数字化、智能化水平。

7. 开展回补效果评估

水利部水资源司组织水利部水利水电规划设计总院等单位及时开展效果评估,分析不同回补方式对回补能力、地下水水位、储量、水质等影响,以及对地面沉降、海(咸)水入侵和其他方面的影响。通过开展生态效益、经济效益分析,评估深层水回补技术和经济上的可行性。

8. 实施“压采、补给、回灌”系统治理

按照“点线面”结合的工作思路,对开采量较大、水位长期较低的区域,需严格落实水资源刚性约束制度,逐步压减深层地下水开采量,同时提高水资源利用效率。让深层地下水休养生息,自然恢复是首选,尽可能通过自然优势通道对深层地下水进行回补,但对于问题突出、保护需求高、地质构造封闭性强的地区,持续探索开展深层地下水人工回补试验,研发安全、高效、经济的深层地下水回补技术,形成具有指导性、推广性的研究成果,推进下一阶段华北地区深层地下水治理修复工作。

9. 完善科研平台建设

按照“将回补试点作为开放式的研究平台,面向地下水治理前沿技术,围绕深层水回补的典型性、机理、规律等开展多方位研究”的要求,借鉴国家及水利部野外科学观测研究站建设运行经验,广泛听取高校、科研院所意见,不断完善深层地下水回补试验场基础条件和试验设备,力争将河北省深层地下水回补试验场打造成多学科交叉、多专业融合、多单位共建,面向全国、走向国际的深层水回补科研平台。

10. 加大专项经费支撑力度

回补试验是非常重要的公益性工作,建议加大专项经费支撑力度,保障回补工作持续运行和回补数据的长期观测,为深层地下水资源的科学开发、利用与管理提供决策依据。

五、结论

华北地区深层地下水修复实践充分体现了问题导向与系统治理的理念,通过“面”上置换减采、“线”上

生态补水、“点”上人工回补的协同策略,有效遏制了地下水水位持续下降态势。但面对剩余超采量治理难度大、回补成本高、生态问题依然突出等现实挑战,需进一步强化政策保障与科技赋能。建议持续加大专项经费投入,深化数字孪生等智能技术应用,完善回补效果评估体系,总结推广可复制的技术模式与管理经验,推动深层地下水修复工作制度化、规范化开展,最终实现“压采有效、补给充分、回灌高效、生态改善”的治理目标,支撑华北地区水资源可持续利用与高质量发展。

参考文献:

- [1] 习近平.论坚持人与自然和谐共生[M].北京:中央文献出版社,2022.
- [2] 曾令武.我国华北片区城市水生态环境特征问题解析及质量提升对策研究[D].北京:北京林业大学,2023.
- [3] 崔志清.贯彻新发展理念 坚持综合施策 全力推进河北省地下水超采综合治理[J].中国水利,2021(7):40-42+39.
- [4] 赵勇,陆垂裕,何鑫,等.华北地区地下水超采治理

十问——地下水,河湖复苏下的涌动[J].中国水利,2023(4):19-25.

- [5] 《华北地区地下水超采综合治理行动方案》印发实施[J].中国水利,2019(4):5.
- [6] 陈飞,丁跃元,李原园,等.华北地区地下水超采治理实践与思考[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):191-198.
- [7] 史文龙,马若绮,陈飞.华北地区深层地下水修复思路与对策[J].中国水利,2024(10):36-41.
- [8] 陈飞,丁跃元,唐世南,等.华北地区河湖生态补水与地下水回补的实践及效果分析[J].中国水利,2021(7):36-39.
- [9] 李新旺,马素英,刘森,等.河北省深层地下水回补研究[J].中国水利,2024(7):28-33.
- [10] 王英虎,郭世娟.河北省地下水超采综合治理河湖地下水回补试点做法及成效[J].中国水利,2020,(13):35-36.
- [11] 赵婧彤.地下水人工补给过程中的促渗技术研究[D].长春:吉林大学,2021.

责任编辑 李博远

(上接第11页)情旱情和水旱灾害防御工作[J].中国防汛抗旱,2024,34(12):1-4+8.

- [16] 仲志余.加快发展水利新质生产力 保障国家水安全[J].中国水利,2024(24):1-6+25.
- [17] 钱峰,王琳,赵占锋,等.对“水利测雨雷达”的新质生产力研究[J].中国水利,2024(18):1-7.
- [18] 李国英.黄河调水调沙关键技术[J].前沿科学,2012,6(1):17-21.
- [19] 刘志雨,刘玉环,孔祥意.中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):1-6.
- [20] 刘春蓁,巢清尘,王守荣,等.水文气象学领域的水文循环研究进展[J].气候变化研究进展,2023,19(1):1-10.
- [21] 刘志雨.提升数字孪生流域建设“四预”能力[J].中国水利,2022(20):11-13.

[22] 刘玉环,刘志雨,李致家,等.华北地区分布式蓄超空间动态组合TOKASIDE-D模型研究[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):105-112.

- [23] 舒全英,马媛,陈亮,等.数字孪生水利建设中的人工智能大模型应用探索[J].中国水利,2025(6):14-30.
- [24] 刘志雨,侯爱中.洪水影响预报和风险预警理念与业务实践[J].水文,2020,40(1):1-6.
- [25] 李新华,贺海涛.“矿鸿”操作系统在神东矿区智能化建设中的探索[J].中国煤炭,2021,47(S1):7-13.
- [26] MORLOT M, RIGON R, FORMETTA G. Hydrological digital twin model of a large anthropized italian alpine catchment: The Adige river basin[J]. Journal of Hydrology, 2024, 629: 130587.

责任编辑 熊 璠